

Title	Experimental Investigation on Mechanical Properties of Nanospring Thin Films Fabricated by Glancing Angle Deposition Technique( Abstract_要旨 )
Author(s)	Shaoguang, Chen
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2017-03-23
URL	<a href="https://doi.org/10.14989/doctor.k20331">https://doi.org/10.14989/doctor.k20331</a>
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博士（工学）	氏名	陳紹広
論文題目	Experimental Investigation on Mechanical Properties of Nanospring Thin Films Fabricated by Glancing Angle Deposition Technique（斜め蒸着法で作製したナノスプリング薄膜の機械特性評価に関する研究）		
(論文内容の要旨)			
<p>動的斜め蒸着法を用いることで、形状制御された無数のナノ要素が集合した薄膜を作製することができ、学术界や産業界から注目を集めている。このような薄膜は、構成要素の形状に起因して特異な力学特性を示すことが予想され、らせん形状を有するナノスプリング薄膜を電子デバイス中の電気接合部へ適用することなど、産業応用が期待されている。特に、銅やアルミニウム等、高い電気伝導率を有するナノスプリング薄膜が求められている。また、デバイスの高信頼性化のためには、用いるナノスプリング薄膜の力学特性の詳細を理解する必要がある。しかし、銅やアルミニウムなどの融点が高い金属では、ナノスプリング薄膜の作製が困難であることが指摘されており、さらに力学特性評価試験の実施には様々な困難があることから、研究が進んでいない。本論文は、融点の低い金属ナノスプリング薄膜の作製を実現する動的斜め蒸着装置の開発とともに、原子間力顕微鏡をベースとした負荷試験装置を用いて、薄膜に対する圧縮負荷試験および一本のナノスプリングに対する引張負荷試験を実施し、ナノスプリング薄膜の力学特性について研究した成果をまとめたものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は緒論であり、研究の背景および本論文の目的を述べている。近年では、ナノ要素で構成された離散構造材料が注目を集めており、均質材とは異なる特性が期待されていることを指摘している。その作製手法の一つである動的斜め蒸着法の詳細な原理を説明するとともに、動的斜め蒸着法で作製された様々なナノスプリング薄膜、および、薄膜のこれまでに明らかにされている特徴的な力学特性についてレビューを行っている。また、半導体電子デバイスの電氣的接合部において、銅やアルミニウムのナノスプリング薄膜が求められていることを説明し、一方、その作製の困難について述べている。さらに、金属ナノスプリング薄膜では、その降伏特性が信頼性に影響を及ぼすことを説明し、降伏特性評価の重要性について指摘している。より詳細な力学特性を理解するために、ナノスプリング一本に対する引張負荷試験の有効性と実験実施の困難についても説明を行っている。以上のように、動的斜め蒸着法で作製された金属ナノスプリング薄膜に関する研究が進んでいない現状を示した上で、本研究の目的を明確にしている。</p> <p>第2章は、これまで作製が困難とされてきた銅ナノスプリング薄膜の実現を目的として、基板温度を低温に制御できる斜め蒸着装置を開発している。融点の低い金属を用いた動的斜め蒸着でナノスプリング要素が形成されない（らせん形状が維持されない）原因は、基板に到達した原子の熱拡散に起因しており、低融点材料ほど影響は大きい。そこで、熱拡散の影響を抑制させるために、蒸着装置中の基板ホルダに液体窒素による冷却用流路および加熱用ヒーターを搭載するこ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	陳紹  広
<p>とを提案し、精密な基板温度コントロールを可能にした動的斜め蒸着装置を開発している。開発装置を用いて、銅ナノスプリング薄膜の作製に成功している。基板温度を変化させた蒸着を実施して銅ナノスプリング形成条件を明らかにし、そのメカニズムについても考察を行っている。さらに、銅よりも融点の低いアルミニウムナノスプリング薄膜の作製にも成功している。両薄膜の作製条件とそれぞれの融点には関連があることを示し、金属ナノスプリング薄膜の形成条件を統一的に説明することに成功している。開発した動的斜め蒸着装置は、精密な温度制御を必要とするナノスプリング薄膜の作製に対して有用である。</p> <p>第3章は、ニッケルを用いて作製したナノスプリング薄膜に対し、原子間力顕微鏡に搭載した微小負荷試験装置を用いて圧縮試験を試みている。負荷用圧子先端の曲率を大きくすることで、無数のナノスプリングに対して均一な負荷を与えることに成功し、最大荷重を漸増させる圧縮－除荷実験の繰り返しにより薄膜の巨視的な降伏強度を特定している。実験から、ニッケルナノスプリング薄膜は、ニッケル均質薄膜に比べて著しく大きな降伏ひずみを示すことを明らかにしている。このメカニズムを解明するために、ナノ～マイクロ材料が示す降伏強度の寸法効果、および、ナノスプリングのらせん形状の効果に着目して検討を行い、両効果の重畳によってニッケルナノスプリング薄膜の巨大な降伏ひずみが実現されていることを定量的に明らかにしている。</p> <p>第4章は、動的斜め蒸着法を用いてシリコンナノスプリング薄膜を作製し、薄膜中の一本のナノスプリングに対する引張り負荷試験を試みている。動的斜め蒸着で作製される薄膜中のナノスプリングは、ナノメートルスケール間隔で密生している。このため、任意の一本のナノスプリングに負荷を与えることが困難である。さらに、ナノサイズの要素に対する引張り負荷の実施も難しく、これまでに実現されていない。密生したナノスプリング群から一本のナノスプリングを抽出するために、ナノプローブを具備したマニピュレータを用いて隣接ナノスプリングを機械的に除去し、さらに電子線硬化接着剤を用いることで、ナノスプリング上端と引張り負荷用圧子の連結に成功している。負荷圧子は、原子間力顕微鏡に用いる自己検知式カンチレバーを流用し、サブ<math>\mu\text{N}</math>レベルの分解能での荷重検知を実現している。実験は走査型電子顕微鏡内で行い、その場観察引張り負荷試験に成功している。得られた挙動をもとに、ナノスプリングの変形および破壊挙動の詳細を議論し、力学的な解明に成功している。このように工夫した力学試験方法を提案し、現在まで未解明であった一本のナノスプリングの力学特性を明らかにしたことに本研究の特徴がある。</p> <p>第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、動的斜め蒸着法で作製されるナノスプリング薄膜に着目し、融点の低い金属ナノスプリングを作製するための蒸着装置の開発、および、精密な負荷実験と解析によりナノスプリング薄膜の変形特性について研究した結果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) これまで作製が困難とされてきた銅ナノスプリング薄膜を実現するための動的斜め蒸着装置の開発を対象としている。開発した装置は、動的斜め蒸着中の基板温度を精密に制御する機能を有しており、ナノスプリング形成の障害となる基板上での蒸着材料の熱拡散を抑制することができる。本装置を用いて銅ナノスプリング要素の作製に成功するとともに、その形成条件の詳細を明らかにしている。さらに融点の低いアルミニウムナノスプリング薄膜についても複数の基板温度条件下での作製を試み、実現に成功している。両材料の融点に着目することで、統一的なナノスプリング薄膜形成条件の解明を行っている。

(2) 金属ナノスプリング薄膜の巨視的な力学特性の評価を対象としている。ニッケルを用いて作製したナノスプリング薄膜に対して、微小負荷試験装置を用いて圧縮試験を実施している。大きな先端曲率半径を有する負荷圧子を用いることで、薄膜に均一な圧縮負荷を与えることに成功している。ニッケルナノスプリング薄膜は、均質薄膜に比べて著しく大きな降伏ひずみを示すことを述べている。この巨大な降伏ひずみは、ナノ～マイクロ材料が有する降伏応力の寸法効果およびナノスプリングの形状効果の重畳によって発現していることを明らかにしている。これまでに解明されていない金属ナノスプリング薄膜の力学特性およびそのメカニズムを明らかにしたことに本研究の特徴がある。

(3) ナノスプリング薄膜中における一本の要素の力学特性の解明を対象としている。シリコンを用いてナノスプリング薄膜を作製し、ナノプローブを用いて密生したナノスプリングから一本の対象試験体を機械的に抽出して、電子顕微鏡内でのその場観察引張負荷試験に成功している。電子線硬化接着剤を用いることで、ナノスプリングへの引張負荷を実現している。その場観察で得られた変形挙動を基に、単体のシリコンナノスプリングの変形および破壊挙動の詳細を解明している。工夫した力学試験方法の提案を行っており、未解明であった一本のナノスプリングの機械特性の詳細を明らかにしたことに本研究の特徴がある。

本論文は、特徴的な形状を有するナノ要素が集合した薄膜の機械特性を実験と解析に基づいて検討し、その詳細を解明したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。